Revista Digital Universitaria
1 de mayo 2011 • Volumen 12 Número 5 • ISSN: 1067-6079

ARTICULO

EN EL MUNDO DE LAS GALAXIAS

Vladimir Avila-Reese
Instituto de Astronomía, UNAM
Coordinador del Departamento de Astronomía Extrágalactica y Cosmología
avila@astro.unam.mx

© Coordinación de Publicaciones Digitales. Dirección General de Cómputo y de Tecnologías de Información y Comunicación -UNAM
Se autoriza la reproducción total o parcial de este artículo, siempre y cuando se cite la fuente completa y su dirección electrónica.

Revista Digital Universitaria

1 de mayo 2011 • Volumen 12 Número 5 • ISSN: 1067-6079

En el mundo de las galaxias

Resumen:

Se presenta una reseña de algunos de los aspectos más relevantes del estudio de las galaxias y los interesantes problemas que plantea dicho estudio para las siguientes décadas. Haciendo un símil con la biología, se describen las principales propiedades y características evolutivas de las galaxias. Se muestra que las mismas son el eslabón clave entre el cosmos actual y el Universo de la Gran Explosión así como laboratorios únicos para abordar el problema de las misteriosas materia y energía oscura. El estudio de las galaxias está generando en el seno de la astronomía las premisas de una nueva revolución científica.

Palabras clave: formación de galaxias, evolución de galaxias, cosmología, materia oscura, energía oscura.

¿Por qué estudiar a las galaxias?

El conocimiento científico es uno de los motores de la evolución de la humanidad. La astronomía como ciencia básica genera un sustento clave e integral para este conocimiento. Ha sido justamente en el escenario astronómico que varias de las revoluciones científicas tuvieron lugar en el pasado. Como solía decir el gran cosmólogo soviético Yakov Zel'dovich, el cosmos no sólo es un laboratorio para pobres, en muchos casos, es el único laboratorio para estudiar diversos aspectos de la naturaleza. Hoy en día una nueva revolución científica se avecina en el seno de la astronomía disparada por descubrimientos relacionados al estudio de las galaxias y las estructuras que ellas conforman. Veamos más en detalle de qué se trata.

Por un lado, múltiples sondeos y evidencias astronómicas muestran que la edad actual del Universo es de 13 mil 700 millones de años, unas tres veces la edad del Sol y la Tierra. Es un Universo en expansión constituido por una infinidad de galaxias, mismas que tejen una compleja red cósmica de filamentos, nudos y enormes huecos; algo que se asemeja a una esponja (figura 1). Y cada galaxia a su vez está compuesta por decenas de millones a cientos de miles de millones de estrellas, gas y polvo interestelar, planetas, etcétera. Las galaxias son complejos "ecosistemas" donde se desarrollan la mayoría de los maravillosos fenómenos cósmicos, incluyendo el de la vida.

© Coordinación de Publicaciones Digitales. Dirección General de Cómputo y de Tecnologías de Información y Comunicación -UNAM
Se autoriza la reproducción total o parcial de este artículo, siempre y cuando se cite la fuente completa y su dirección electrónica.

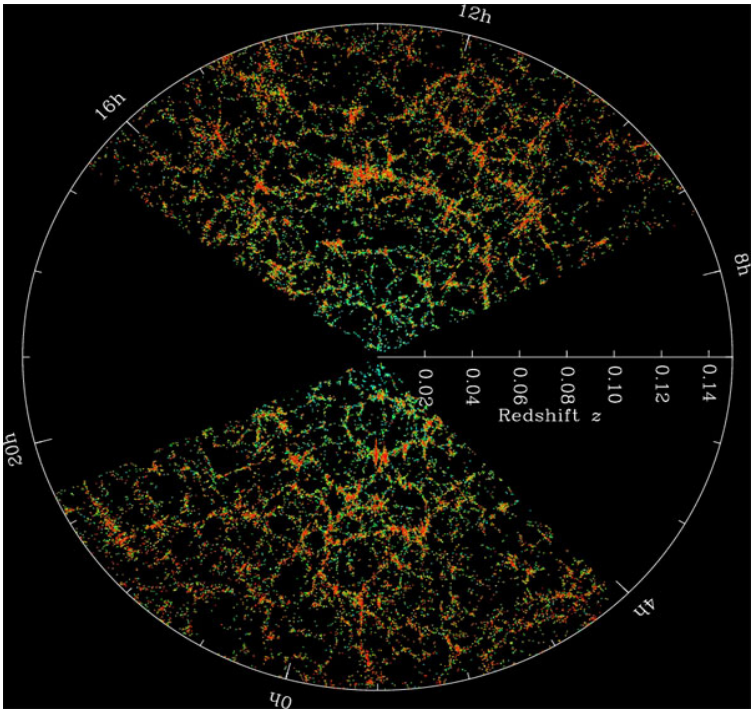

Figura 1. Estructura a gran escala del Universo vista en una estrecha rebanada del cielo del Norte. El color de cada galaxia está codificado de acuerdo a su luminosidad

Fuente: SDSS, www.sdss.org/

Por otro lado, el fósil cósmico más antiguo que los astrónomos observan, la Radiación Cósmica de Fondo en Microondas (RCFM), proviene de una época cuando la edad del Universo fue 36 mil veces menor a la actual. En épocas anteriores no habían planetas, estrellas, galaxias; ni siquiera podían existir los átomos como tales pues la radiación del Universo caliente tenía energía suficiente como para arrancarles sus electrones (ionización) a los únicos tipos de núcleos atómicos que se formaron en las épocas de la Gran Explosión, los de hidrógeno y helio. No obstante, debido a la expansión del espacio, esta radiación se enfría y a los 380 mil años ya no puede interactuar más con los electrones, con la materia… y desde entonces viaja casi inalterada, simplemente enfriándose. Hoy la detectamos como la RCFM, misma que baña uniformemente el cielo y con timidez nos enseña cómo estaban las cosas en los albores del Universo: la materia ordinaria conformaba un plasma caliente en interacción con la radiación distribuido de manera bastante uniforme. Sólo con detectores ultra-sensibles en microondas es que se pudo descubrir impresa en la RCFM fluctuaciones extremadamente tenues sobre el fondo uniforme, con amplitudes de uno en diez o cien mil (anisotropías, figura 2). Estas "irregularidades" son mucho menores en proporción a las que deja el trazo de un lápiz con relación al espesor de la hoja de papel.

© Coordinación de Publicaciones Digitales. Dirección General de Cómputo y de Tecnologías de Información y Comunicación -UNAM
Se autoriza la reproducción total o parcial de este artículo, siempre y cuando se cite la fuente completa y su dirección electrónica.

1 de mayo 2011 • Volumen 12 Número 5 • ISSN: 1067-6079

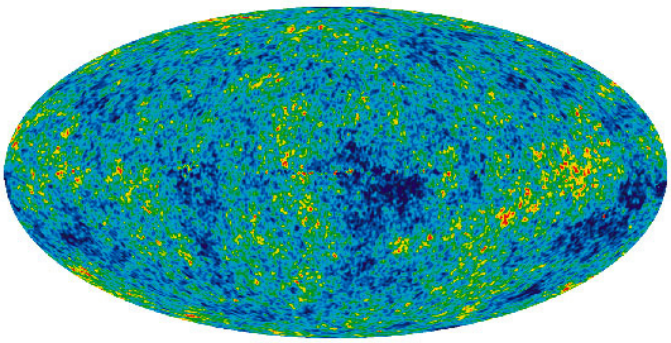

Figura 2. Mapa de las fluctuaciones de la RCFM en el cielo. Estas fluctuaciones son las semillas que evolucionan gravitacionalmente hasta convertirse en las estructuras cósmicas actuales. Fuente: NASA / WMAP Science Team, http://map.gsfc.nasa.gov/

El problema está planteado querido lector: ¿cómo es que de ese estado inicial caliente y casi uniforme, con fluctuaciones tan tenues, evolucionamos al complejo Universo actual de galaxias y filamentos? En la analogía con la hoja de papel, las galaxias actuales serían “corrugosidades” que se elevan hasta varios metros de altura sobre la misma!. El eslabón perdido entre el cosmos actual y el Universo caliente de la Gran Explosión está en las galaxias.

El entender cómo evolucionan las galaxias, desde las tenues fluctuaciones primigenias hasta las complejas y densas estructuras del presente, constituye uno de los principales retos de la astronomía del siglo XXI. Pero además tal reto implica mucho más que entender per se la evolución de estos gigantescos sistemas y sus componentes, incluyendo el origen de las primeras estrellas y de la radiación que recalentó el grueso del gas intergaláctico. Implica también constreñir la naturaleza y propiedades de la misteriosa materia oscura, así como los procesos más tempranos del Universo, aquellos que ya no son accesibles a la observación directa pero que posiblemente dejaron impresa su huella en las galaxias y su distribución espacial. Por otro lado, los sondeos observacionales del cielo que se están planeando con los instrumentos más sofisticados del futuro (incluyendo a México), permitirán usar las poblaciones de galaxias observadas a diferentes épocas como trazadoras de la historia de expansión del Universo y dar cuenta así de las propiedades de ese medio repulsivo que hoy en día está produciendo una aceleración en la expansión, medio que se estima es más del 70% de lo que hay en el Universo actual y que se bautizó como energía oscura.

© Coordinación de Publicaciones Digitales. Dirección General de Cómputo y de Tecnologías de Información y Comunicación -UNAM
Se autoriza la reproducción total o parcial de este artículo, siempre y cuando se cite la fuente completa y su dirección electrónica.

La sorpresiva composición del Universo actual establecida tras múltiples sondeos cosmológicos (ver figura 3), donde la materia ordinaria es sólo un 4.5%, requiere de explicaciones: ¿qué es ese 22.5% que llamamos materia oscura y que domina por completo en las galaxias? ¿qué es ese 73% que llamamos energía oscura y al que le achacamos la reciente aceleración de la expansión del Universo? ¿Qué rol juegan en la evolución del Universo y en la constitución del mundo de las partículas elementales estas componentes invisibles que los astrónomos han descubierto? ¿O podría ser que más que de nuevas componentes se trata de evidencias de nuevas leyes de la física o de una nueva teoría cosmológica o de la existencia de más dimensiones espaciales… o de algo más?

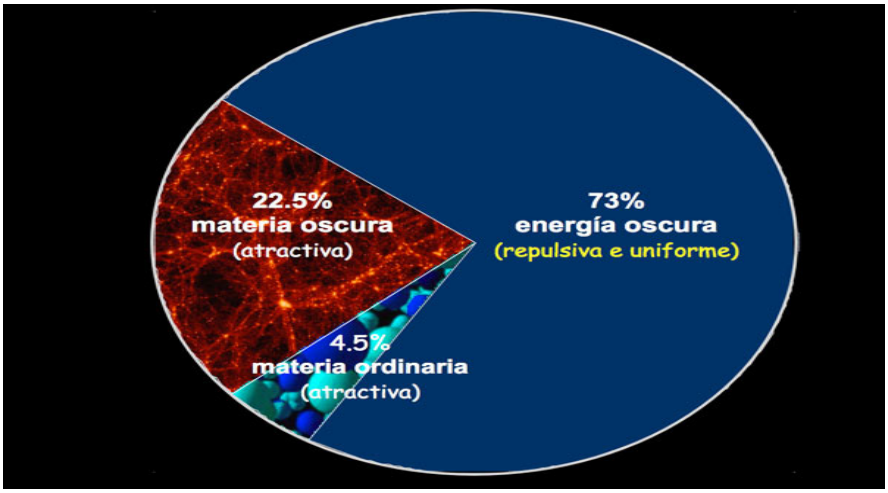

Figura. 3. Composición del Universo actual.

Sea cual sea la respuesta, introducirá un nuevo paradigma en la ciencia. Y para encontrarla, la principal herramienta de búsqueda seguirá siendo el estudio de las galaxias y su evolución. Este estudio abrió un nuevo horizonte de conocimientos –una verdadera caja de Pandora- el cual ya no se puede ignorar y habrá que recorrerlo hasta sus últimas consecuencias.

¿Qué son las galaxias?

El descubrimiento de las galaxias se dio hace menos de 90 años atrás por parte del brillante astrónomo Edwin Hubble. Resolviendo estrellas y midiendo distancias hacia objetos difusos que se descubrían con los telescopios de la época, Hubble llegó a la conclusión de que muchos de estos objetos estaban a millones de años luz de distancia, muy lejos para ser cuerpos asociados a estrellas; se trataba más bien de conglomerados de miles de millones de estrellas, verdaderas "islas del Universo". La primera galaxia que él reportó en 1924 fue Andrómeda y resultó ser la compañera casi gemela de nuestra galaxia, la Vía Láctea.

La Vía Láctea es un sistema gravitacionalmente ligado de al menos 200 mil millones de estrellas, gas y polvo interestelares, campos magnéticos y radiación, todo agrupado en un disco de más de 100 mil años luz de diámetro y un esferoide de estrellas viejas (bulbo) en el centro (Fig. 4).

© Coordinación de Publicaciones Digitales. Dirección General de Cómputo y de Tecnologías de Información y Comunicación -UNAM
Se autoriza la reproducción total o parcial de este artículo, siempre y cuando se cite la fuente completa y su dirección electrónica.

1 de mayo 2011 • Volumen 12 Número 5 • ISSN: 1067-6079

En el disco hay estrellas de todas las edades, incluyendo muchas en gestación o muy jóvenes; éstas se disponen principalmente a lo largo de preciosos brazos espirales donde se apila también mucho gas frío del cual se forman justamente las estrellas. La mayor parte del disco está rotando a grandes velocidades. El Sol, por ejemplo, se está moviendo a lo largo de su órbita a unos 800 mil kilómetros por hora. Pero la Vía Láctea es tan grande que una vuelta completa, incluso a semejante velocidad, le toma más de 220 millones de años! Imagínese usted, ni los dinosaurios aparecían cuando dimos la última vuelta.

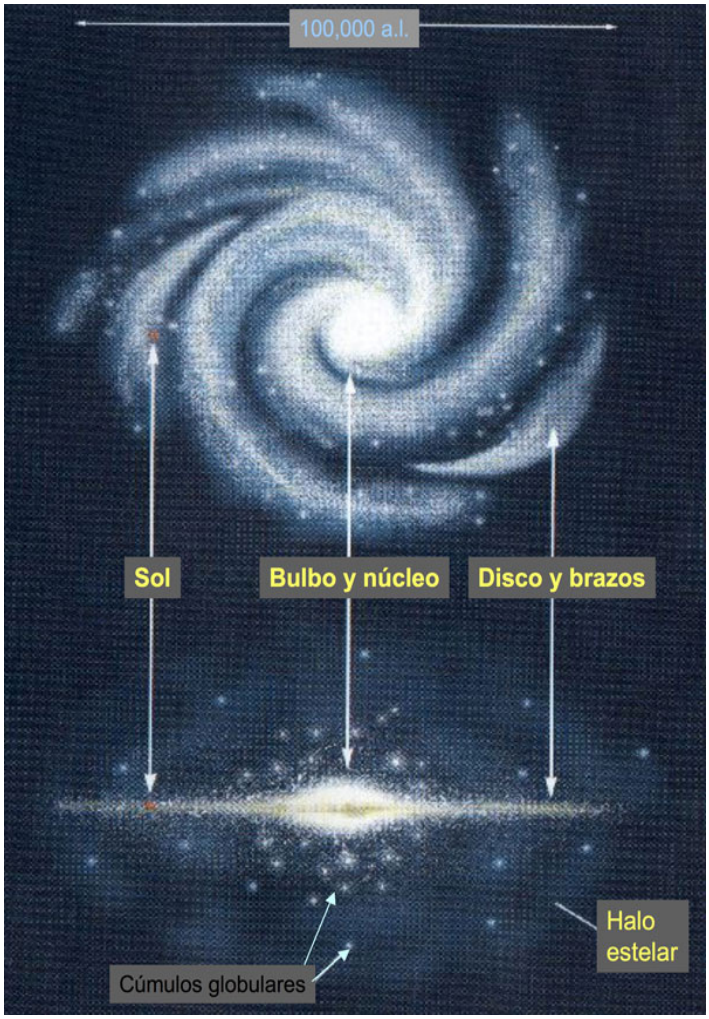

Figura. 4. Esquema de frente y de costado de la parte visible de la Vía Láctea.

Por otro lado, con esa velocidad de rotación el disco tendría que estar desbaratándose a menos que algo lo mantenga cohesionado; ese algo es la atracción gravitacional producida por la materia. Sin embargo la estimación de toda la masa contenida en estrellas, gas y polvo está muy por debajo de lo requerido para mantener confinado un disco rotando tan rápido. Por ésta y otras razones, los astrónomos infieren que en realidad la Vía Láctea y todas las galaxias están embebidas en enormes esferoides de materia invisible (halos), con masas 20 y más veces mayores a la de la galaxia que brilla. Es la famosa materia oscura, posiblemente el ingrediente más importante de las

© Coordinación de Publicaciones Digitales. Dirección General de Cómputo y de Tecnologías de Información y Comunicación -UNAM
Se autoriza la reproducción total o parcial de este artículo, siempre y cuando se cite la fuente completa y su dirección electrónica.

galaxias, el que más abunda y el molde que les imprime sus principales propiedades visibles.

Andrómeda y el 30-40% de las galaxias del Universo son más o menos como la Vía Láctea. Aunque las hay de tipos muy diferentes y con tamaños mucho menores y mayores (ver abajo), en general la definición de una galaxia se puede parafrasear así: es un sistema de estrellas, medio interestelar y campos magnéticos ligado gravitacionalmente principalmente por un enorme halo de materia oscura; en este sistema las estrellas nacen, viven y mueren en constante interacción con el medio interestelar del cual se forman y al cual inyectan luego energía y elementos químicos procesados en sus entrañas. Pero las galaxias, desde el punto de vista del Universo como un todo, se pueden definir también como las mínimas unidades estructurales del mismo, las desviaciones de la homogeneidad (perturbaciones) que evolucionaron gravitacionalmente y que como tales tejen la estructura a gran escala del Universo y trazan su movimiento global de expansión.

El estudio de las galaxias

El estudio de las galaxias se fue abordando con diferentes enfoques y en función de las capacidades observacionales de la época. Pero el avance también dependió del grado de conocimiento que los astrónomos fueron adquiriendo sobre la formación y evolución estelar, la física del medio interestelar, la evolución química, la cosmología, etc. En lo que sigue de este artículo, presentaré los distintos estudios realizados y sus principales conclusiones haciendo una analogía con la biología para plantear finalmente cuáles son los retos de las siguientes décadas. El lector interesado en aspectos más especializados puede consultar una reseña completa en Blanton & Moustakas (2009).

Estudios "taxonómicos"

La propiedad más vistosa de las galaxias al telescopio es su morfología. Por eso el mismo Hubble, luego de obtener cientos de placas fotográficas de galaxias se dio a la tarea de hacer una clasificación morfológica, clasificación que sigue vigente al día de hoy. De acuerdo a la misma (ver fgura 5), hay una secuencia de galaxias de forma elipsoidal hasta esferoidal (galaxias elípticas); luego está la secuencia de galaxias con bellos brazos espirales (galaxias espirales), secuencia que se divide en dos ramas: las que no tienen y las que tienen una barra central. Finalmente hay una familia de galaxias sin forma definida, llamadas irregulares. La secuencia morfológica de Hubble se puede también ver como una secuencia desde las galaxias puramente esferoidales (elípticas), sin una componente discoidal, pasando por las que tienen una componente discoidal cada vez más dominante con relación al esferoide (espirales) y terminando en las que son sólo discos (irregulares).

© Coordinación de Publicaciones Digitales. Dirección General de Cómputo y de Tecnologías de Información y Comunicación -UNAM
Se autoriza la reproducción total o parcial de este artículo, siempre y cuando se cite la fuente completa y su dirección electrónica.

1 de mayo 2011 • Volumen 12 Número 5 • ISSN: 1067-6079

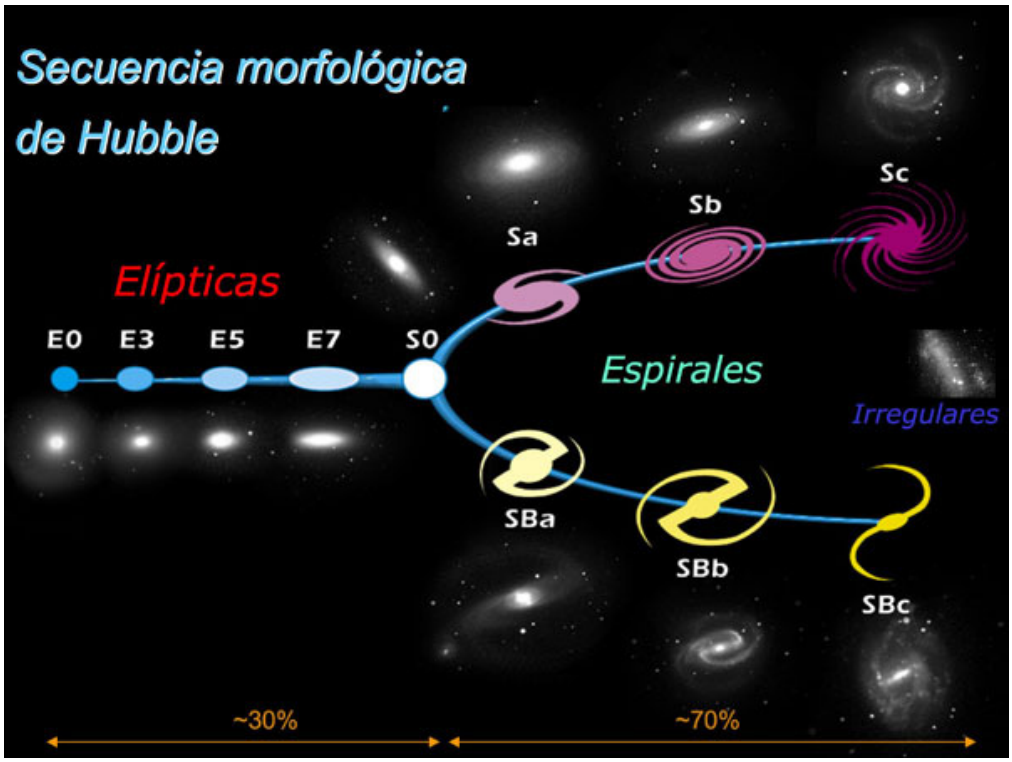

Figura. 5. Clasificación morfológica de las galaxias. Para ver imágenes espectaculares de galaxias obtenidas con el Telescopio Espacial Hubble ir a: http://heritage.stsci.edu/gallery/gallery_category.html

Estudios "anatómicos"

A medida que las capacidades observacionales en diferentes longitudes de onda mejoraban y nuestro entendimiento de la evolución de las estrellas y del medio interestelar crecía, se empezó a disectar en detalle el interior de las galaxias. A la simple morfología se añadieron propiedades como la edad promedio de su población estelar, la fracción de gas, la tasa de formación estelar de toda la galaxia, la abundancia química (metalicidad), las propiedades del vasto medio interestelar, etcétera. También se midieron el tipo de movimientos que tienen las estrellas y el gas dentro de las galaxias. La componente esferoidal se sostiene contra la gravedad por el movimiento desordenado de sus estrellas, mientras que la componente discoidal lo hace por el movimiento ordenado de rotación (equilibrio centrífugo).

Pronto se entendió que las propiedades morfológicas iban de la mano de las anatómicas:

a) La componente esferoidal tiende a estar constituida por una población vieja de estrellas de baja metalicidad, tiene poco gas, baja formación estelar y es compacta, implicando todo esto que los esferoides galácticos se formaron temprano a través de un proceso violento (fusión entre galaxias) en el cual casi todo el gas se consumió en estrellas que luego envejecen sin que haya

© Coordinación de Publicaciones Digitales. Dirección General de Cómputo y de Tecnologías de Información y Comunicación -UNAM
Se autoriza la reproducción total o parcial de este artículo, siempre y cuando se cite la fuente completa y su dirección electrónica.

más formación estelar.

b) La componente discoidal tiende a estar constituida por poblaciones estelares de todas las edades, incluyendo jóvenes y de alta metalicidad, tiene altos contenidos de gas, formación estelar aún en curso y una distribución espacial extendida; todo esto implica que los discos galácticos se han ido ensamblando paulatinamente de adentro hacia fuera con una constante y ordenada caída de gas de alto momento angular.

Por otro lado, como ya se mencionó, las galaxias visibles parecen ser sólo la punta del iceberg. El rápido movimiento de rotación de los discos (así como la alta dispersión de velocidades de las estrellas en los esferoides), requiere de mucha más materia que la que suman las estrellas y el gas si queremos tener galaxias en equilibrio. Esa materia invisible extra constituye una especie de enorme recipiente que confina a la galaxia, un recipiente que se extiende 10-20 veces más allá del tamaño de la galaxia visible y que contiene mucha más masa que ella! Son los halos de materia oscura.

Estudios más recientes han demostrado la existencia de los halos oscuros de una manera directa, usando el fenómeno de la lente gravitatoria introducido por Albert Einstein. La luz emitida por fuentes lejanas sufre deflexión al pasar cerca de una concentración de masa, cual si atravesara una lente óptica. Teniendo a disposición en los modernos catastros del cielo cientos de miles de galaxias lejanas de fondo, se ha podido reconstruir la distribución de masa de las galaxias más cercanas en base a las pequeñas pero sistemáticas deformaciones que sufren las imágenes de las galaxias de fondo (lente débil). Para todas las galaxias estudiadas con esta técnica se han inferido la existencia en ellas de enormes halos oscuros 20 o más veces más masivos que las galaxias en sí.

Estudios "ecológicos"

Hubble empezó estudiando apenas decenas de galaxias, las más cercanas y sólo usando imágenes en placas fotográficas. Con telescopios más poderosos, con detectores en múltiples longitudes de onda, con estudios espectroscópicos además de los de imagen, la información sobre poblaciones enteras de galaxias, sus movimientos y su distribución espacial a gran escala comenzó a crecer rápidamente. Los modernos catastros de galaxias obtenidos con un solo instrumento (lo cual alivia mucho el problema de calibración y homogeneización de los datos) contienen varios cientos de miles de galaxias… algo exquisito para extraer información estadística y para estudiar cómo se distribuyen las galaxias y cuánto dependen sus propiedades del medio ambiente en que habitan. Es así que se pueden realizar estudios de tipo "ecológico".

Las galaxias dominadas por esferoides gustan de los ambientes más densos: las regiones

© Coordinación de Publicaciones Digitales. Dirección General de Cómputo y de Tecnologías de Información y Comunicación -UNAM
Se autoriza la reproducción total o parcial de este artículo, siempre y cuando se cite la fuente completa y su dirección electrónica.

1 de mayo 2011 • Volumen 12 Número 5 • ISSN: 1067-6079

centrales de los cúmulos de galaxias (ver figura 6), conglomerados ligados gravitacionalmente de decenas o centenares de galaxias que se localizan en las intersecciones de los filamentos. En estas regiones multitudinarias hubo en el pasado muchas fusiones de galaxias lo cual se cree dio origen justamente a las abultadas y viejas galaxias elípticas. Las galaxias con dominio de disco prefieren regiones menos densas como ser los filamentos, donde pueden ser parte de grupos pequeños, o incluso los deshabitados huecos donde las pocas galaxias que se encuentran allá se cree son verdaderas “doncellas inmaculadas”… pero ya sabe usted, las apariencias engañan a veces y habrá que comprobar esto con observaciones detalladas en curso.

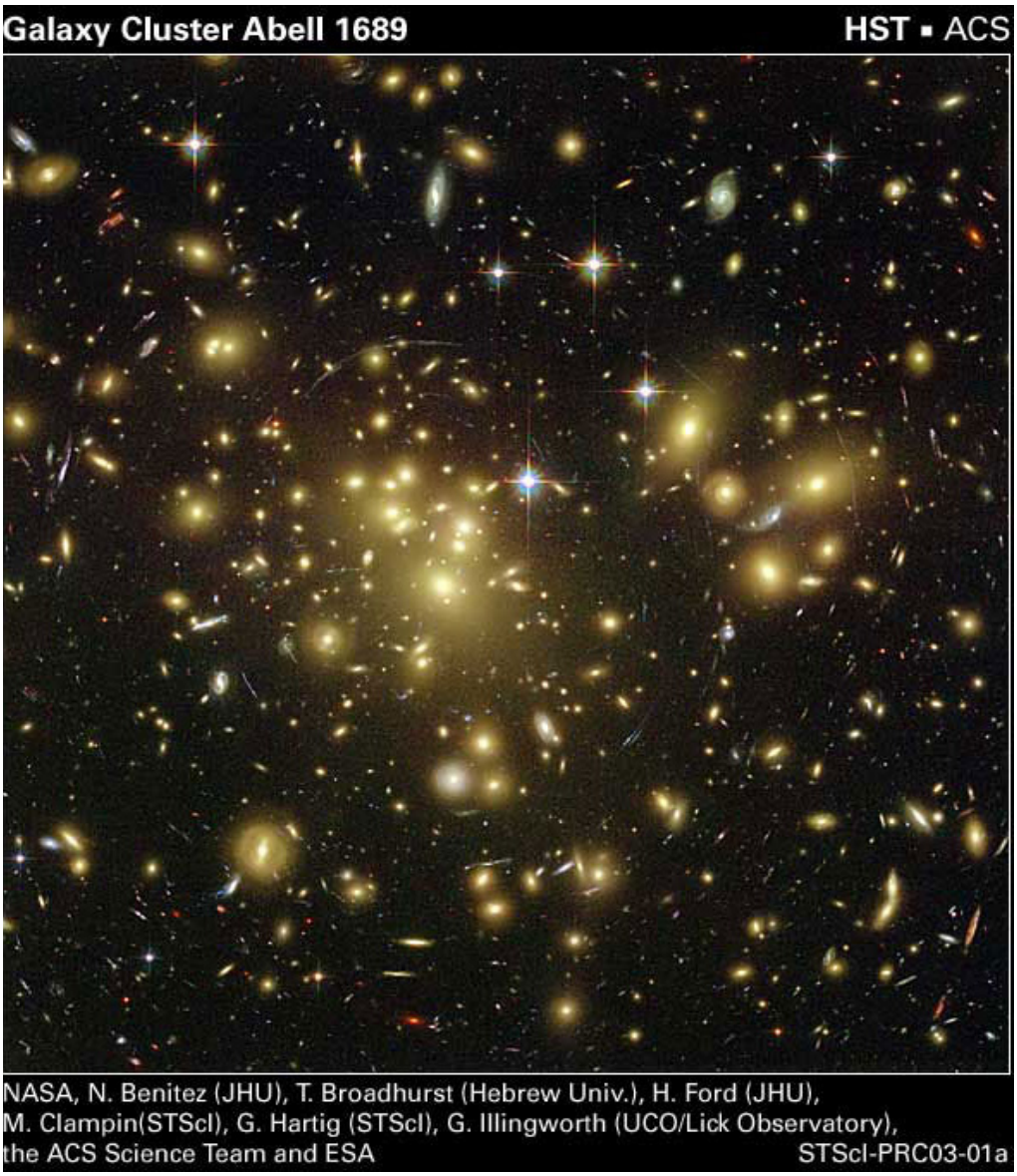

Figura 6. Cúmulo de galaxias Abell 1689. Los arcos que se ven son deformaciones de galaxias de fondo producidas por la gravedad del cúmulo (lente gravitatoria fuerte).

Fuente: NASA/HST.

© Coordinación de Publicaciones Digitales. Dirección General de Cómputo y de Tecnologías de Información y Comunicación -UNAM
Se autoriza la reproducción total o parcial de este artículo, siempre y cuando se cite la fuente completa y su dirección electrónica.

La población de galaxias muestra una peculiar distribución de luminosidades. La abundancia de galaxias con luminosidades mayores a la Vía Láctea decae exponencialmente al punto que prácticamente no existen galaxias 10 veces más luminosas que ella y casi todas son elípticas. La abundancia de galaxias menos luminosas que la Vía Láctea aumenta como ley de potencias mientras menor es la luminosidad y éstas tienden a ser espirales e irregulares. Luego aparentemente hay un corte; las observaciones actuales muestran que es muy raro encontrar galaxias con luminosidades 5000 veces menores a la Vía Láctea.

Estudios "paleontológicos y filogénicos"

Las propiedades de las poblaciones estelares de una galaxia son fósiles de la historia de formación estelar y de ensamblaje de la misma. Los astrónomos, cual paleontólogos, observan esos fósiles y con modelos reconstruyen el pasado de las galaxias, por ejemplo de la Vía Láctea. Estos estudios han mostrado que las galaxias elípticas ensamblaron y transformaron el grueso de su gas en estrellas "rápida y furiosamente" muy en el pasado. Por otro lado, las galaxias de disco se ensamblaron más paulatinamente y fueron consumiendo su gas en estrellas de una manera económica y autorregulada (autosustentada diría un economista).

Más que reconstruir, lo óptimo sería poder ver directamente la evolución en acción de las galaxias; y esto sí se puede hacer parcialmente en astronomía ya que los telescopios son máquinas del tiempo que detectan la luz emanada en el pasado. Ya en los años 60 se descubrieron galaxias cuya luz provenía de épocas cuando el Universo tenía una quinta parte o menos de su edad actual. Son los cuasares, objetos que irradian energía con una potencia (luminosidad) descomunal; en realidad la fuente de esa energía no son las estrellas de la galaxia sino que el gas que es despiadadamente atraído y calentado por un agujero negro supermasivo en el núcleo de la galaxia. Todo apunta a que en los cuasares estamos viendo la niñez de lo que hoy en día son las galaxias elípticas. Fue hasta finales de los 90 que los poderosos telescopios y novedosos métodos observacionales permitieron la detección rutinaria de poblaciones de galaxias más normales que los cuasares a diferentes épocas, algunas tan lejanas como cuando el universo tenía menos de una décima de su edad actual.

En la última década se logró esbozar un cuadro preliminar de cómo evolucionan las galaxias, basado en las "instantáneas" que se tienen del Universo a diferentes épocas. Primero que nada, por si alguien aún lo dudaba, las galaxias sí evolucionan: se ve que en el pasado en promedio eran más pequeñas, más activas en formar estrellas, más interactuantes.

De hecho, la tasa de formación estelar global en el Universo fue 10-15 veces más alta cuando

© Coordinación de Publicaciones Digitales. Dirección General de Cómputo y de Tecnologías de Información y Comunicación -UNAM
Se autoriza la reproducción total o parcial de este artículo, siempre y cuando se cite la fuente completa y su dirección electrónica.

1 de mayo 2011 • Volumen 12 Número 5 • ISSN: 1067-6079

tenía un cuarto de su edad actual… literalmente nos estamos apagando. Las observaciones muestran que las galaxias más masivas y que hoy en día son de tipo elípticas ya estaban ensambladas muy en el pasado; a medida que pasa el tiempo, galaxias más pequeñas van culminando su ensamblaje y apagando su formación estelar. Las galaxias aún más pequeñas aparentemente inician su ensamblaje tardíamente y al día de hoy están formando estrellas muy activamente. A esta tendencia general de las galaxias de ensamblar su masa estelar y apagar la formación de estrellas más temprano mientras más masiva es la galaxia se la llamó achicamiento ("downsizing").

Estudios "genéticos"

Los astrónomos empezaron a "manipular" libremente a las galaxias con el fin de entender su génesis y de encontrar el código genético que determina su ulterior evolución y propiedades actuales apenas hace unos veinte años atrás, cuando surgió un escenario cosmológico de evolución de las perturbaciones primigenias. Según este escenario, las perturbaciones primigenias provienen de las fluctuaciones cuánticas del vacío, el estado original del Universo en el que no existían aún ni las partículas ni los campos. Cuando el vacío cuántico se desintegraba a la inimaginablemente corta edad de una milésima de quintimillonésima de segundo (10^{-33} s) la tensión del vacío alcanza a inflar desenfrenadamente al espacio y luego las partículas virtuales del vacío se convierten en partículas y campos reales; a su vez las fluctuaciones cuánticas se transforman en perturbaciones clásicas; entramos en la era caliente del Universo de la Gran Explosión.

Las perturbaciones sufren una serie de procesos y su huella digital queda impresa en la RCFM (Fig. 1), así que podemos comprobar cuan correcta es la teoría. Si son sólo de materia ordinaria (bariónica), aquella que interactúa con la radiación electromagnética, entonces durante el dominio de la radiación caliente es fácil mostrar que se borran las de masas correspondientes a lo que son las galaxias hoy en día. ¡Ese si que es un problema, nos quedamos sin semillas! Pero si lo que domina es la materia oscura exótica, las perturbaciones hechas de esta materia, al no interactuar con la radiación, no sufren del proceso de borrado y aumentan su amplitud (se hacen más densas) por atracción gravitacional. Llega un momento cuando las perturbaciones de materia oscura más pequeñas colapsan y se convierten en estructuras autogravitantes (filamentos y halos); más tarde lo hacen perturbaciones más grandes que incorporan a las más pequeñas en un proceso jerárquico. La idea es que el gas de materia ordinaria es atrapado gravitacionalmente por los filamentos y halos oscuros y paulatinamente cae al centro de los mismos donde finalmente se formarán las galaxias cual espuma en enormes olas. Este es el escenario jerárquico de Materia Oscura Fría (MOF) uno de cuyos padres es el mexicano egresado de la UNAM Carlos Frenk.

El paradigma cosmológico de la formación de galaxias

© Coordinación de Publicaciones Digitales. Dirección General de Cómputo y de Tecnologías de Información y Comunicación -UNAM
Se autoriza la reproducción total o parcial de este artículo, siempre y cuando se cite la fuente completa y su dirección electrónica.

Y ahora la pregunta favorita de los científicos a la par de los niños: ¿por qué? ¿Por qué las galaxias presentan esa diversidad resumida en la secuencia morfológica de Hubble y qué dio origen a ella? ¿Por qué la función de distribución de luminosidades es como se describió? ¿Por qué las galaxias se agrupan a grandes escalas de una forma que se asemeja a una esponja? ¿Por qué más del 95% de la masa de las galaxias está en la materia oscura y qué rol juegan los halos oscuros en la formación y evolución de las galaxias? ¿Qué es esa materia oscura? ¿Por qué en el pasado la formación de estrellas y galaxias fue muy activa y desde su máximo, cuando la edad del Universo fue 1/4 de la actual, decreció en promedio 10-15 veces hacia el día de hoy? Estas son algunas de las preguntas que se vienen intentando responder en la última década y que son motivo de ambiciosos programas científicos a ser implementados en los observatorios y supercomputadoras más avanzados del mundo.

En el escenario de MOF el código genético de las galaxias está en los halos oscuros. Debido a que la MOF es no colisional y no interactúa con la radiación, entonces el proceso de ensamblaje de los halos oscuros es puramente gravitacional. Cálculos de todo tipo, en especial los realizados en supercomputadoras con técnicas de N cuerpos, muestran los siguientes aspectos que remarco aquí:

1) La evolución gravitacional del campo de perturbaciones primigenio converge de manera natural hacia una estructura de gran escala tipo esponja (figura 7). 2) La estructura interna de los halos oscuros se revela similar a la que se requiere para mantener en equilibrio a las galaxias. 3) La historia de ensamblaje de los halos es tal que hay incorporación gradual de materia y desde que la edad del Universo fue 1/4 de la actual, la tasa de colapso y agregación de materia en promedio de toda la población de halos se calcula decreció un factor 10 hasta el presente. 4) Los halos adquieren algo de momento angular por torcas de marea durante su colapso gravitacional; por ende también el gas atrapado, y si éste cae luego al centro conservando el momento angular, su velocidad de rotación crecerá hasta que entra en equilibrio centrífugo formando discos muy similares al de las galaxias reales. 5) Por otro lado, en las regiones más densas, los halos sufren violentas fusiones en el pasado, y si los discos que habitan estos halos se fusionan también, entonces el resultado será un esferoide de estrellas originadas tras violentos brotes de formación estelar.

© Coordinación de Publicaciones Digitales. Dirección General de Cómputo y de Tecnologías de Información y Comunicación -UNAM
Se autoriza la reproducción total o parcial de este artículo, siempre y cuando se cite la fuente completa y su dirección electrónica.

1 de mayo 2011 • Volumen 12 Número 5 • ISSN: 1067-6079

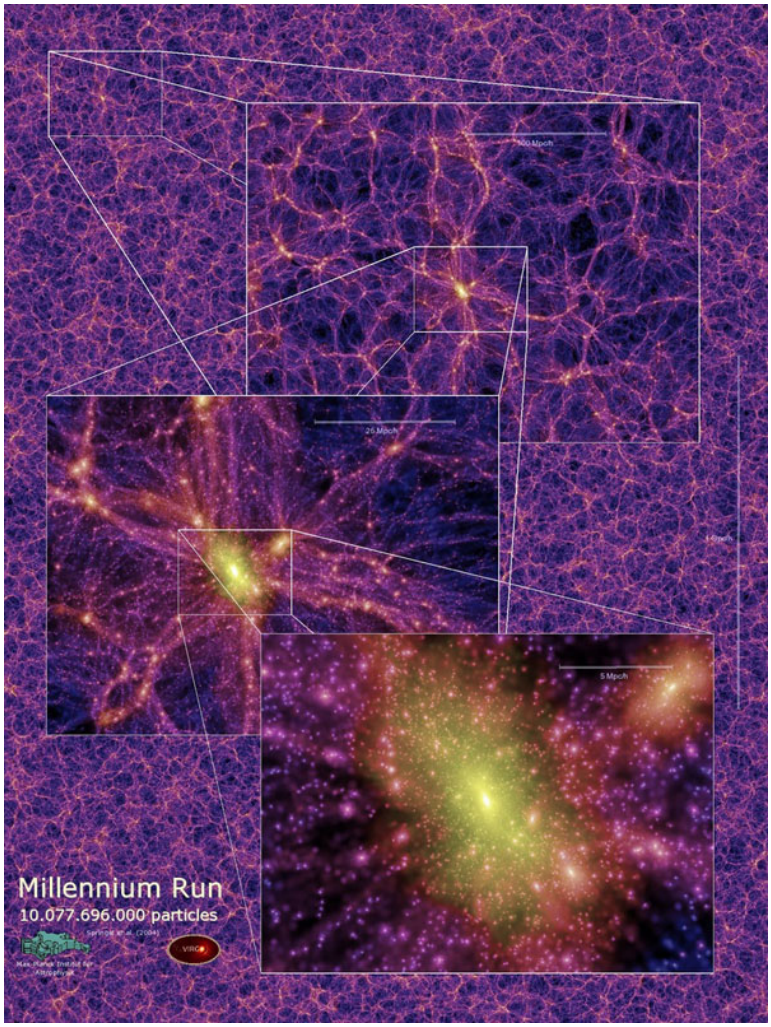

Fig. 7. Distribución tipo esponja de la materia oscura fría después de evolucionar gravitacionalmente hasta el día de hoy de acuerdo al resultado de la simulación de N cuerpos del Milenio. Los paneles muestran ampliaciones por factores de 4 cada una. El panel inferior tiene la escala de un cúmulo de galaxias. Fuente: Virgo Consortium, www.virgo.dur.ac.uk/

De los aspectos remarcados, el lector atento ya se habrá dado cuenta que el escenario de MOF ofrece elementos claves para explicar las propiedades descritas de las galaxias, su evolución y el por qué su distribución a gran escala es como una esponja. Es impresionante su acuerdo con las observaciones a nivel de la distribución a gran escala de las galaxias y la consistencia que tiene este escenario cosmológico con las fluctuaciones de la RCFM. Es por esto que hoy en día es ampliamente aceptado. Nuestro grupo en la UNAM ha participado activamente en el desarrollo de este escenario. Para ampliar más sobre estos temas, puede consultar por ejemplo Avila-Reese (2007,2009) y el libro especializado reciente de Mo, van den Bosch & White (2010).

Aunque hay muchos candidatos propuestos para la MOF, el más viable es una partícula elemental

© Coordinación de Publicaciones Digitales. Dirección General de Cómputo y de Tecnologías de Información y Comunicación -UNAM
Se autoriza la reproducción total o parcial de este artículo, siempre y cuando se cite la fuente completa y su dirección electrónica.

masiva que se predice en la teoría más sencilla de supersimetría de la física de partículas: el neutralino. Si las perturbaciones son de neutralinos, pueden haber halos oscuros de masas tan pequeñas como la de la Tierra. Las simulaciones numéricas muestran que muchos mini-halos se fusionan jerárquicamente para formar halos más grandes pero otros sobreviven y dentro de halos como el de la Vía Láctea tendrían que haber miles de esos mini-halos. Si la materia oscura fuese del tipo tibia y no fría (por ejemplo partículas menos masivas que el neutralino, tales como los neutrinos estériles), entonces las perturbaciones menos masivas no sobreviven y un halo como el de la Vía Láctea tendría muy pocos mini-halos en su interior. ¿No es fascinante? ¡Las partículas elementales del microcosmos determinan las propiedades de estructuras cósmicas del macrocosmos!

De esta manera, con observaciones astronómicas precisas y una teoría de formación de galaxias en los halos de materia oscura se podrá dilucidar sobre las propiedades de la misteriosa materia oscura, empresa en la que nuestro grupo en la UNAM ya dio algunos pasos importantes.

Dificultades y retos

El escenario de MOF enfrenta potenciales dificultades como ser:

(a) la densidad de materia muy alta en el centro de los halos,

(b) la sobre-abundancia de mini-halos y

(c) la historia de ensamblaje de masa de los halos en función de la escala (jerárquico) aparentemente inverso al observado para la masa estelar de las galaxias ("downsizing").

En Puebles & Nusser (2010) se presenta más en detalle algunos de éstos y otros problemas. No obstante, la mayoría de tales dificultades están sujetas a los todavía no muy entendidos procesos del gas así como a la manera de comparar las observaciones (mismas que son sesgadas) con las predicciones. De confirmarse las dificultades mencionadas, el paso que sigue es introducir modificaciones al escenario que no estropeen sus excelentes predicciones a gran escala; la más viable por el momento es proponer materia oscura tibia en vez de fría.

Entre los retos más relevantes para el escenario jerárquico de MOF remarco los siguientes:

1) Ahondar en el entendimiento y modelación de los procesos físicos relacionados al gas que es atrapado por los halos. En particular es importante entender bien el proceso de transformación del gas en estrellas, tanto en los discos como durante las fusiones violentas. Las estrellas inyectan energía y momento al medio interestelar, en especial las masivas que explotan como supernovas

© Coordinación de Publicaciones Digitales. Dirección General de Cómputo y de Tecnologías de Información y Comunicación -UNAM
Se autoriza la reproducción total o parcial de este artículo, siempre y cuando se cite la fuente completa y su dirección electrónica.

1 de mayo 2011 • Volumen 12 Número 5 • ISSN: 1067-6079

y esto altera fuertemente las condiciones de ulterior formación estelar (retroalimentación) e incluso, si el potencial de la galaxia-halo es bajo, el gas sale eyectado quedando entonces galaxias muy poco masivas dentro de los halos pequeños (así se observa justamente). También es clave entender mejor el calentamiento y expulsión del gas que producen los núcleos activos en galaxias masivas, calentamiento que puede justamente explicar porqué las galaxias elípticas estancan su crecimiento. Por último, es clave estudiar más a fondo las propiedades del medio intergaláctico pues de eso depende en parte cuánto gas es atrapado por los halos, desde épocas remotas cuando se formaron las primeras estrellas y galaxias.

2) Incorporando modelos realistas de la física del gas, poner a prueba la formación de galaxias en el escenario cosmológico de MOF y sus variantes (materia oscura tibia por ejemplo) a través de grandes simulaciones numéricas y confrontar los resultados con las observaciones tanto de galaxias locales como del pasado. El resultado de dicha confrontación confirmaría la validez del escenario cosmológico actual y abriría las puertas para avanzar hacia nuevos retos o, en caso contrario, mostraría que es necesaria una revisión radical de la física fundamental.

3) Detectar a los neutralinos de manera directa (aquí en la Tierra) o indirecta (por sus efectos cósmicos como ser aniquilación en rayos gamma en los centros de halos o formación de mini-halos oscuros que podrían ser descubiertos con técnicas de lente gravitatoria). Explorar también otras propuestas de MOF o incluso tibia. De confirmarse la existencia de los neutralinos, se lograría un cuadro unificado no sólo a nivel de cosmología y astronomía sino que además de física de partículas elementales.

4) Constreñir mejor sus propiedades y entender qué es la energía oscura. En realidad el escenario cosmológico de MOF, para ser consistente con los sondeos cosmológicos y estar de acuerdo con edades y otras características evolutivas de las galaxias, requiere de energía oscura en forma de constante cosmológica . La interpretación física de es la de un residuo ínfimo que quedó del vacío cuántico primigenio. Esta interpretación enfrenta serios problemas teóricos por lo que alternativas y observaciones para confirmarlas son necesarias. El reto es reconstruir la historia de expansión del Universo, misma que depende en mucho del contenido y propiedades de la energía oscura la cual contrarresta el frenado que produce la materia. Observando la distribución a gran escala de decenas de miles de galaxias en el pasado, se puede establecer a través de las huellas de las así llamadas oscilaciones bariónicas acústicas una especie de regla cósmica estándar para medir distancias a diferentes épocas y así determinar la tasa de expansión del Universo en cada época.

© Coordinación de Publicaciones Digitales. Dirección General de Cómputo y de Tecnologías de Información y Comunicación -UNAM
Se autoriza la reproducción total o parcial de este artículo, siempre y cuando se cite la fuente completa y su dirección electrónica.

Conclusiones y la astronomía de las siguientes décadas

A menos de 90 años de su descubrimiento, el estudio de las galaxias abrió nuevos horizontes tanto en la astronomía como en la cosmología, la física de campos y partículas elementales, y otras ramas de la ciencia. Siendo las galaxias eslabones entre el Universo de la Gran Explosión y el mundo cósmico actual, a través de su estudio se logró esbozar un cuadro global de la historia del cosmos donde la materia y energías oscuras son ingredientes claves como lo muestra esquemáticamente la figura 8. Los grandes retos de las décadas venideras serán ahondar en este cuadro, comprobarlo o encontrar alternativas. Dado el carácter integrador de la naturaleza que contiene este cuadro, las conclusiones a las que se lleguen implicarán ineludiblemente una revolución científica con profundas implicaciones culturales e impredecibles consecuencias y aplicaciones.

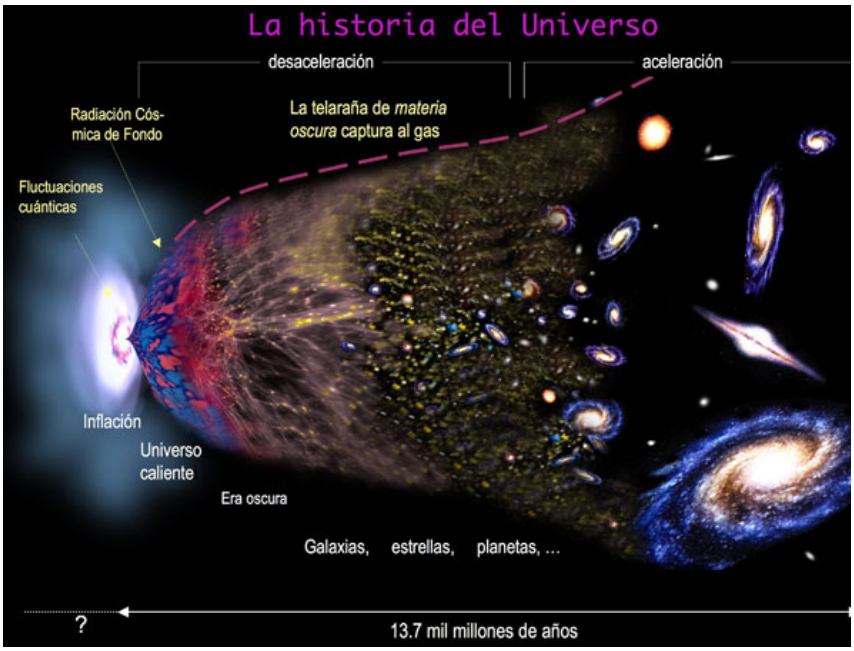

Figura 8. Origen y evolución de las perturbaciones en un Universo en expansión.

Para abordar los mencionados retos, los análisis a realizar conllevan un carácter multidimensional y masivo: millones de galaxias observadas en observatorios tanto en imagen como en espectros, en la mayor cantidad posible de longitudes de onda y a diferentes corrimientos al rojo (épocas). La magnitud de los procesos de adquisición, reducción y procesamiento de los datos así como del análisis de la información extraída y su confrontación con los modelos y simulaciones numéricas van a cambiar la manera de hacer astronomía. Los observatorios más sofisticados del mundo estarán dedicados principalmente a programas de elaboración de catastros que barrerán periódicamente

© Coordinación de Publicaciones Digitales. Dirección General de Cómputo y de Tecnologías de Información y Comunicación -UNAM
Se autoriza la reproducción total o parcial de este artículo, siempre y cuando se cite la fuente completa y su dirección electrónica.

1 de mayo 2011 • Volumen 12 Número 5 • ISSN: 1067-6079

el cielo obteniendo datos homogéneos y completos de cada parcela de la esfera celeste en 2D y en profundidad, es decir hacia el pasado. Petabytes de datos generados serán reducidos, calibrados y procesados de manera automática en “pipelines” y almacenados adecuadamente en Observatorios Virtuales accesibles para todos, incluyendo estudiantes e investigadores en países en desarrollo. De igual manera, podrán estar disponibles los datos procesados de enormes simulaciones numéricas. De esta manera, una de las principales habilidades del astrónomo del futuro será la minería de datos, la capacidad de generar algoritmos eficientes de búsqueda, de correlación cruzada, de visualización, etc. Y ciertamente tendrá no sólo muchísima más información del cielo procesada a disposición, sino que más tiempo para dedicar su creatividad a la fases de generación de entendimiento y de integración en lo que se puede llamar sabiduría, el sumo de lo que es el conocimiento.

Bibliografía

Avila-Reese, V. 2007, Understanding Galaxy Formation and Evolution, Ap&SS Proceedings, “Solar, stellar and galactic connections between particle physics and astrophysics”, Springer (2007), p. 115 (http://arxiv.org/abs/astro-ph/0605212)

Avila-Reese, V. 2009, Un Universo inverosímil, *Ciencia* (Revista de la Academia Mexicana de Ciencias), vol. 60, núm. 1, p. 55

Blanton, M. R., & Moustakas, J. 2009, Physical Properties and Environments of Nearby Galaxies, *Annual Review of Astronomy & Astrophysics,* 47, 159

Mo, H., van den Bosch, F. & White, S. 2010, *Galaxy Formation and Evolution*, Cambridge University Press, 2010. ISBN: 9780521857932

Peebles, P.J.E.,& Nusser, A. 2010, Nearby galaxies as pointers to a better theory of cosmic evolution, *Nature*, 465, 565

© Coordinación de Publicaciones Digitales. Dirección General de Cómputo y de Tecnologías de Información y Comunicación -UNAM
Se autoriza la reproducción total o parcial de este artículo, siempre y cuando se cite la fuente completa y su dirección electrónica.

© Coordinación de Publicaciones Digitales. Dirección General de Cómputo y de
Tecnologías de Información y Comunicación -UNAM
Se autoriza la reproducción total o parcial de este artículo, siempre y cuando se cite la fuente completa y su dirección electrónica.